



Troposferisch ozon

en het klimaat



De chemische samenstelling van de atmosfeer hangt op vele manieren samen met de toestand van het klimaat op mondiale, regionale en lokale schaal.

Hier zullen we een aantal aspecten van deze interactie bespreken aan de hand van veranderingen die in recente jaren zijn waargenomen in de ozonconcentraties boven Europa.

Troposferisch ozon is na kooldioxide en methaan het belangrijkste broeikasgas. Maar in de schattingen van de invloed van ozon op het klimaat zitten grote onzekerheden. Een beter begrip van troposferisch ozon is daarom van groot belang.

TROPOSFERISCH EN STRATOSFERISCH OZON

Het is ten eerste van belang onderscheid te maken tussen ozon op verschillende hoogtes.

Ozon tussen ongeveer 12 en 50 kilometer boven het oppervlak (de stratosferische ozonlaag) is van cruciaal belang voor het leven op aarde, omdat het schadelijke UV-straling van de zon tegenhoudt. In de stratosfeer wordt ozon (O₃) direct gevormd uit zuurstof (O₂) onder invloed van zonlicht. De menselijke uitstoot van chloorfluorkoolstoffen (cfk's) heeft een negatieve invloed op de ozonlaag en is de oorzaak van het jaarlijks ontstaan van het ozongat boven de Zuidpool. Na het ondertekenen van het internationale Protocol van Montreal in 1987 is de uitstoot van cfk's sterk afgenomen, en de verwachting is dat de stratosferische ozonlaag zich halverwege deze eeuw zal herstellen.

Veranderingen in de ozonconcentraties in de troposfeer (tot een hoogte van ongeveer 12 km) spelen een belangrijke rol in opwarming van de aarde. Ozon wordt niet direct uitgestoten, maar wordt gevormd in de troposfeer

door oxidatie van precursorgassen zoals koolstofmonoxide (CO), methaan (CH₄) en andere vluchtige koolwaterstoffen in de aanwezigheid van stikstofoxiden (NO_x) en zonlicht. De toename van de emissies van deze gassen in de twintigste eeuw heeft de hoeveelheid ozon in de troposfeer sterk verhoogd. Vooral in de hogere troposfeer (tussen 5 en 12 km), waar de temperaturen laag zijn, is ozon een sterk broeikasgas. Volgens de laatste klimaatrapportage van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is de bijdrage van troposferisch ozon aan de stralingsforcering tussen de 0,25 en 0,65 W/m², met 0,35 W/m² als beste schatting. Recente modelberekeningen laten zien dat de toename van troposferisch ozon in de periode 1890 tot 1990 vooral sterk heeft bijgedragen aan de opwarming van het Noordpoolgebied in de winter en de lente (ongeveer 0,4-0,5 °C) en vervuilde gebieden van het Noordelijk Halfrond in de zomer (lokaal meer dan 0,5 °C).

Directe blootstelling aan verhoogde ozonconcentraties is schadelijk voor mens en natuur. In Europa is er regelgeving rond ozon en worden er grenzen gesteld aan de ozoncon-

centraties aan de grond. Vooral in warme zomers vinden er lokaal overschrijdingen plaats, gerelateerd aan de uitstoot van ozonprecursorgassen.

Vanwege de verticale uitwisseling in de atmosfeer, is er sprake van een samenhang tussen de concentraties in de stratosfeer en de troposfeer enerzijds en de vrije troposfeer en de grenslaag aan de grond anderzijds.

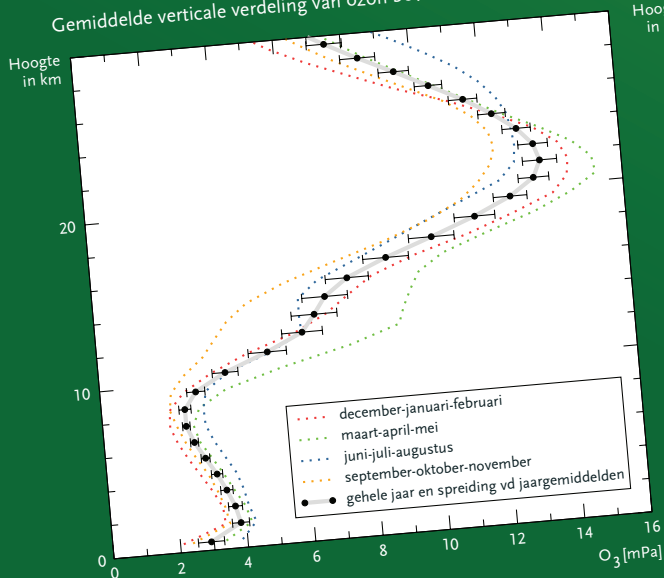
EFFECTEN VAN EMISSIEBELEID IN EUROPA

In Europa is de uitstoot van gassen waaruit ozon gevormd kan worden, aanzienlijk gereduceerd sinds eind jaren '80. Dit heeft sterk wisselende effecten gehad op de ozonconcentraties in Europa. De gemeten concentraties op grondniveau laten een gevarieerd beeld zien over de laatste 10-15 jaar, waarbij de trends sterk afhankelijk zijn van de locatie van het meetstation en van het seizoen. De meeste stations in vervuilde gebieden vertonen een verlaging van de hoge ozonconcentraties, met name 's zomers, en een verhoging van de lage concentraties, met name 's winters. Dit patroon is kwalitatief in overeenstemming met een afname

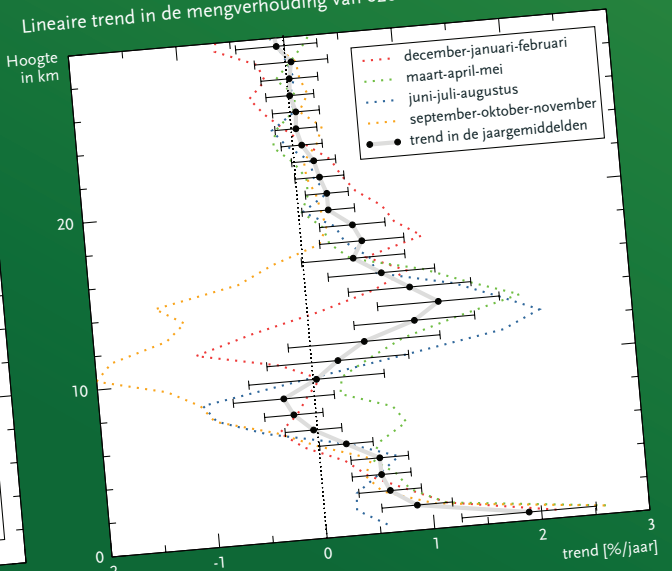
In De Bilt wordt sinds december 1992 wekelijks een ozonsonde opgelaten die de ozonconcentratie meet vanaf de grond tot in de stratosfeer samen met meteorologische grootheden als temperatuur, luchtvochtigheid en windsnelheid.

De linkerfiguur toont de waargenomen gemiddelde verticale verdeling van ozon boven de Bilt, waarbij langs de horizontale as de partiële druk van ozon is weergegeven. De datapunten geven de gemiddelde waarden over de volledige jaren 1993 tot en met 2007 en de foutenbalken de standaardafwijkingen in de onderliggende jaargemiddelde waarden. De seizoensgemiddelde verdelingen over de periode december 1992 tot en met november 2007 zijn aangegeven met stippellijnen. De rechterfiguur toont de bijbehorende jaar- en seizoensgemiddelde trends in de mengverhouding van ozon.

Gemiddelde verticale verdeling van ozon boven De Bilt (1993-2007)



Lineaire trend in de mengverhouding van ozon boven De Bilt (1993-2007)



Box 4.1 Waargenomen trends in de ozonconcentraties boven De Bilt

van de lokale uitstoot. In brongebieden leidt dat namelijk tot een verlaging van de ozonproductie, die vooral in de zomer plaatsvindt, maar ook tot een afname van de verwijdering van ozon door reactie met stikstofmonoxide (NO), die vooral in de winter van belang is.

Het KNMI-terrein in De Bilt is een voorbeeld van een locatie die sterk beïnvloed wordt door emissies uit de nabije omgeving (zie box 4.1).

ACHTERGRONDCONCENTRATIES

De gemeten trends kunnen echter slechts gedeeltelijk worden verklaard door de afname van de lokale emissies. Ook de achtergrondconcentratie in Europa, dat wil zeggen de concentratie die niet door lokale bronnen wordt beïnvloed, is veranderd. Deze vertoont een jaarlijkse cyclus met een maximum in de lente en een minimum in de zomer. Metingen van de achtergrondconcentratie in Mace Head aan de westkust van Ierland vertonen een toename van de hoeveelheid ozon die vanaf de Atlantische Oceaan wordt aangevoerd. Over de afgelopen twintig jaar (1987-2007) is de mengverhouding van ozon (dit is het aantal moleculen ozon op het totale aantal moleculen in een volume lucht) toegenomen met

$0,31 \pm 0,12$ ppb (parts per billion) per jaar. Op een gemiddelde van 38,4 ppb over deze periode, komt dit overeen met een relatieve toename van $0,81 \pm 0,31$ procent per jaar. Omdat de toename het sterkst is in de lente en in de winter en het zwakst in de zomer, is ook de amplitude van de jaarlijkse cyclus toegenomen. In feite is de achtergrondconcentratie toegenomen tot eind jaren '90 en lijkt deze zich hierna min of meer te hebben gestabiliseerd.

Ook op grotere hoogten vertonen de ozonconcentraties boven Europa een opwaartse trend in de jaren '90, met name 's winters. Dit blijkt uit de meetreeksen van de bergstations Jungfrauoch in de Zwitserse Alpen (3580 m boven zeeniveau) en Zugspitze in Zuid-Beieren (2962 m), uit de met sondes gemeten verticale profielen boven Payerne in Zwitserland, en uit vliegtuigmetingen boven Frankfurt en Parijs.

OORZAKEN VAN DE WAARGENOMEN VERANDERINGEN IN DE OZON-CONCENTRATIE

Mogelijk hebben verschillende factoren bijgedragen aan de toename van troposferisch ozon boven Europa in de jaren '90. De belangrijkste zullen we hieronder bespreken.

Intercontinentaal transport van ozon en ozonprecursorgassen zoals NO_x, CO en koolwaterstoffen vanuit Noord-Amerika en in mindere mate vanuit Azië draagt in belangrijke mate bij aan de achtergrondconcentraties boven Europa, met name in de lente.

Veranderingen in het transport van ozon en ozonprecursorgassen vanuit Noord-Amerika lijken echter van ondergeschikt belang voor het begrijpen van de trend in ozon. De antropogene emissies van ozonprecursorgassen in Noord-Amerika zijn relatief stabiel gebleven of licht afgenomen in de jaren '90. Ook de mogelijkheid dat het transport over de Atlantische Oceaan naar Europa effectiever is geworden in de jaren '90, kan worden uitgesloten. In de lente hangt dit transport namelijk samen met de sterkte van de Noord-Atlantische Oscillatie (NAO), een grootschalig windpatroon. De NAO-index, die de sterkte van de westenwind aangeeft, is echter afgenomen sinds begin jaren '90.

In Azië zijn de antropogene emissies de afgelopen 10-15 jaar enorm snel gegroeid, met name in China. Satellietmetingen laten een verdubbeling zien van de hoeveelheid stikstofdioxide in de troposfeer boven China tussen

1996 en 2005, vergelijkbaar met de economische groei (zie box 4.2). De toename van de emissies in China heeft echter slechts een beperkte invloed gehad op de ozonconcentraties in Europa. Op basis van modelberekeningen zou een verdubbeling van de antropogene emissies in Oost-Azië (inclusief die in Japan en Korea) een toename van de mengverhouding van ozon op grondniveau in Europa opleveren van maximaal ongeveer 1 ppb in de lente – veel minder dan de waargenomen toename.

In 1998-1999 en 2002-2003 vertonen de metingen extra hoge ozonconcentraties door de invloed van bosbranden in Canada en Siberië, waarbij grote hoeveelheden CO₂ en ozonprecursorgassen zijn vrijgekomen. De grootste branden vonden plaats in Siberië in de zomer en herfst van 1998, 2002 en 2003. De Canadese branden zijn weliswaar veel kleiner van

Satellietmetingen spelen een belangrijke rol bij de bepaling van de concentraties van sporengassen in de atmosfeer. Instrumenten zoals GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) op de ERS-2-satelliet van ESA, SCIAMACHY op ESA-Envisat, en OMI (Ozone Monitoring Instrument) op EOS-Aura van NASA zijn in staat om luchtvervuiling dicht bij het oppervlak te meten. Nederland en het KNMI leveren hierbij een belangrijke bijdrage. OMI is een Nederlands-Fins instrument en het KNMI heeft de wetenschappelijke leiding over het OMI-project.

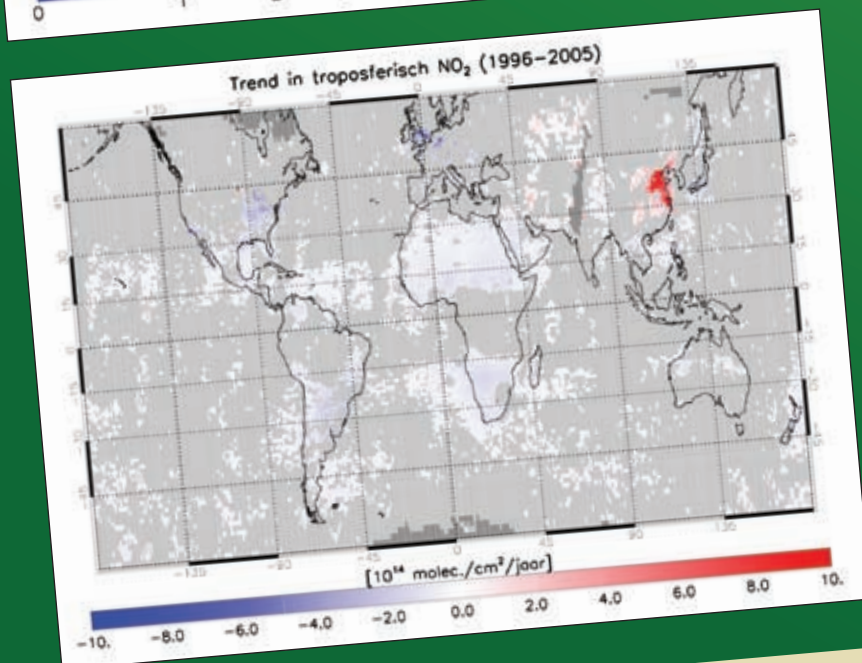
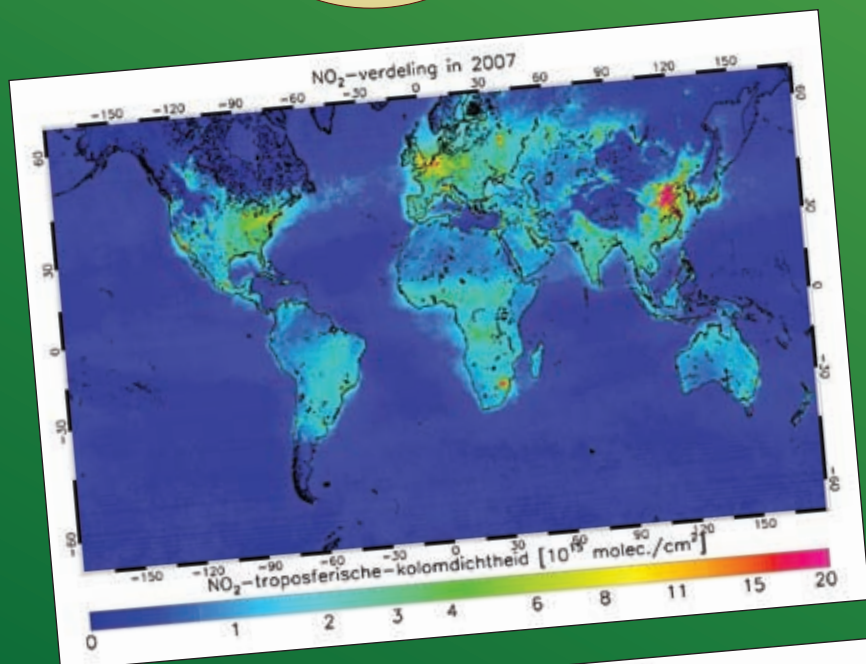
De eerste figuur geeft de mondiale verdeling van stikstofdioxide (NO₂) in de troposfeer weer voor het jaar 2007, gemeten door het OMI-instrument. Rood en geel corresponderen met hoge concentraties. Deze komen in het algemeen voor in geïndustrialiseerde gebieden, grote steden en gebieden met een grote bevolkingsdichtheid, waar relatief veel stikstofoxiden (NO_x is NO en NO₂) worden uitgestoten. Blauwe kleuren corresponderen met lage concentraties in schone gebieden.

De tweede figuur laat de veranderingen in

de hoeveelheid NO₂ in de troposfeer zien in de periode 1996 tot en met 2005, afgeleid uit de satellietmetingen van GOME en SCIAMACHY. De rode gebieden laten een sterke toename zien, de blauwe gebieden een afname. De witte gebieden corresponderen met een geringe toe- of afname, of met lage concentraties. Gebieden in grijs hebben geen significante trend opgeleverd. Voor de donkergrijze gebieden waren niet genoeg metingen beschikbaar om een tijdserie van troposferisch NO₂ uit te construeren.

Voor Oost-Azië en China laten een enorme toename in NO₂ zien, welke wordt veroorzaakt door een toename in de uitstoot van NO_x. De trend boven China komt gemiddeld genomen overeen met een verdubbeling van de uitstoot in 10 jaar. Deze sterke toename in stikstofoxiden leidt tot een toename van de regionale ozonproductie. Een deel van het geproduceerde ozon wordt over grote afstanden getransporteerd en draagt bij aan de ozonconcentraties boven de vs en Europa, waar de hoeveelheid NO₂ in de troposfeer juist is afgenomen door lokale reducties in de uitstoot van NO_x.

Box 4.2 Veranderingen in de hoeveelheid stikstofdioxide in de troposfeer, gemeten met satellieten



Vervolg Box 4.2 Veranderingen in de hoeveelheid stikstofdioxide in de troposfeer gemeten met satellieten

omvang geweest, maar hebben een relatief grotere invloed gehad op de ozonconcentraties in Mace Head.

De toename van de emissies van scheepvaart is ook van belang. De huidige bijdrage van scheepvaart aan de mengverhouding van ozon in Mace Head wordt geschat op ongeveer 6 ppb in de zomer en 1 ppb in de winter. Gemiddeld over het jaar is deze bijdrage zo'n 2,5 ppb. Uitgaande van een groei van het scheepverkeer van ongeveer 2% per jaar, levert dit een toename van de jaargemiddelde mengverhouding in Mace Head van 0,05 ppb per jaar. De toename van scheepvaart kan dus slechts een klein gedeelte van de waargenomen trend verklaren.

De mengverhouding van methaan is sinds 1990 met ongeveer 2% toegenomen tot 1751 ppb in 1999 en is daarna vrijwel constant gebleven. In modelstudies leidt een reductie van de huidige mengverhouding van methaan met 20% tot een afname van de jaargemiddelde mengverhouding van ozon op grondniveau in Europa met ongeveer 1,2 ppb, waarbij de impact 's zomers het grootst is. Omgerekend naar de 2%-stijging die in de jaren '90 is waargenomen, levert dat slechts een marginale toename van de ozonconcentratie in deze periode. Een andere factor die uit een aantal recente studies naar voren is gekomen, is dat sinds het midden van de jaren '90 een versterking

van de grootschalige circulatie in de stratosfeer heeft plaatsgevonden. Deze circulatie transporteert ozon van de tropen, waar veel ozon wordt gevormd, naar hogere geografische breedtes en lagere delen van de stratosfeer, waar uitwisseling met de troposfeer plaatsvindt. Een vergelijking van metingen van ozonsondes boven Payerne en Hohenpeissenberg (Zuid-Duitsland) en van de bovengenoemde bergstations Jungfraujoch en Zugspitze over de periode 1992-2004 heeft laten zien dat er in de winter en in de lente een significante correlatie bestaat tussen de ozonconcentraties in de vrije troposfeer en in de lagere stratosfeer. Ook ozonsondes opgelaten boven Canada laten sterk oplopende ozonconcentraties zien in de troposfeer en in de lagere stratosfeer (beneden ongeveer 19 km) tussen 1993 en 2001. Bovendien vertonen de vrije troposfeer en de lagere stratosfeer vergelijkbare trends en een significante correlatie in de tijd. Vliegtuigmetingen boven de Noord-Atlantische Oceaan laten een vergelijkbare correlatie zien. Deze waarnemingen wijzen erop dat ten minste een deel van de toename in troposferisch ozon op gematigde noordelijke breedten en in het Noordpoolgebied is toe te schrijven aan een toename in de ozonconcentraties in de lagere stratosfeer sinds het midden van de jaren '90. Overigens is de laatstgenoemde toename toe te schrijven aan een versterking van de stratosferische circulatie en niet aan

een algemeen herstel van de ozonlaag door veranderingen in de chemie van de stratosfeer.

CONCLUSIE EN VOORUITZICHT

De gemeten trends in de ozonconcentraties boven Europa kunnen slechts gedeeltelijk worden verklaard door veranderingen in de emissies van ozonprecursorgassen in and buiten Europa. Het lijkt erop dat een versterking van de stratosferische circulatie een belangrijke oorzaak is geweest van de toename van de ozonconcentraties in de vrije troposfeer sinds de jaren '90.

De meeste klimaatmodellen voorspellen dat de opwarming van de aarde de stratosferische circulatie en daarmee de instroom van ozon vanuit de stratosfeer verder zal versterken. Daar staat tegenover dat de afbraak van ozon in de troposfeer onder invloed van zonlicht, die vooral boven de tropische oceanen plaatsvindt, in de toekomst sneller zal verlopen door een hogere luchtvochtigheid. Ook de frequentie en omvang van bosbranden, de natuurlijke emissies van methaan en andere ozonprecursorgassen, en de productie van stikstofoxiden in de hogere troposfeer door bliksem kunnen veranderen onder invloed van veranderingen in het mondiale klimaat, maar de uitwerkingen van deze koppelingen tussen de chemie van de atmosfeer en het klimaat zijn nog onvoldoende bekend. Een warmer klimaat in Europa kan ook bijdragen

aan het relatief vaker voorkomen van weersomstandigheden die ozonsmog kunnen veroorzaken (zie box 4.3). Klimaatverandering vormt daarmee een belangrijke, maar onzekere factor voor onze toekomstige luchtkwaliteit.

Omgekeerd levert troposferisch ozon een belangrijke bijdrage aan het broeikas effect. De studie die het KNMI maakt van de processen die de ozonconcentratie bepalen is van belang voor het kwantificeren van de klimaatforcering en het verkleinen van de onzekerheden daarin.

• • • • VERDER LEZEN

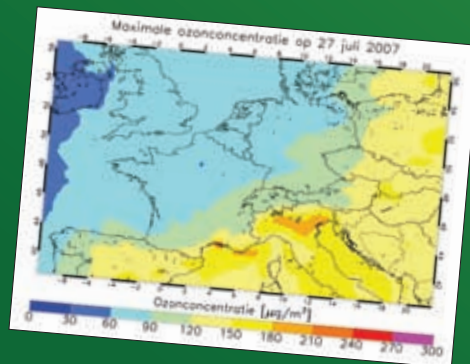
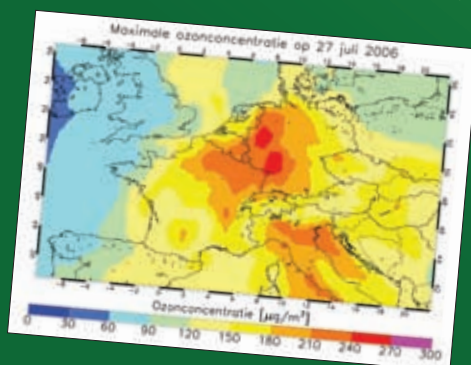
- Voor de bijdrage van troposferisch ozon tot de opwarming van de aarde in de vorige eeuw, zie Shindell, D., G. Falvegi, A. Lacis, J. Hansen, R. Ruedy, E. Aguilar (2006), *Role of tropospheric ozone increases in 20th-century climate change*, *Journal of Geophysical Research*, 111, D08302, doi: 10.1029/2005JD006348.
- De Mace Head-metingen zijn beschreven in Derwent, R.G., P.G. Simmonds, A.J. Manning, en T.G. Spain, *Trends over a 20-year period from 1987 to 2007 in surface ozone at the atmospheric research station, Mace Head, Ireland*, *Atmospheric Environment*, 41, 9091-9098.
- Voor een analyse van de trends in ozonconcentraties in Europa sinds 1990, zie Jonson, J.E., D. Simpson, H. Fagerli, en S. Solberg (2006), *Can we explain the trends in European ozone levels?*, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 51-66.
- De laatste inzichten over de bijdragen van intercontinentaal transport aan de ozonconcentraties boven Europa zijn samengevat in het 2007-rapport van de Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution (HTAP), te vinden op: www.htap.org.

De luchtkwaliteit boven Europa wordt sterk beïnvloed door de meteorologische omstandigheden. Vooral hoge temperaturen en sterke zonne-instraling spelen een belangrijke rol bij de vorming van ozonsmog. Met name gedurende warme, zonnige periodes in de zomer kan de ozonconcentratie daarvoor sterk toenemen.

In de figuren zijn de maximale ozonconcentraties weergegeven op 27 juli 2006 en 2007. Een concentratie van 100 microgram ozon per kubieke meter lucht komt overeen met een mengverhouding van ongeveer 50 ppb. In de Europese regelgeving omtrent luchtkwaliteit zijn de informatie- en waarschuwingsdrempel vastgesteld op respectievelijk 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (oranje) en 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (rood). De ozonconcentraties zijn

berekend met het Franse luchtkwaliteitsmodel CHIMERE, en onafhankelijke metingen aan de grond laten vergelijkbare concentraties zien. In de periode 25-29 juli 2006 was het erg warm en zonnig in West-Europa, omstandigheden die hebben geleid tot relatief hoge ozonconcentraties. Dit in tegenstelling tot dezelfde periode in 2007, een koele zomer.

De afname van emissies van precursorgassen in Europa zal naar verwachting leiden tot een verlaging van de hoge ozonwaarden en een vermindering van het aantal overschrijdingen van de Europese normen in de zomer. Hogere zomertemperaturen door klimaatverandering zouden dit effect echter deels teniet kunnen doen.



Box 4.3 De relatie tussen luchtkwaliteit en klimaat